

Physiologie de la perception et de l'action

M. Alain BERTHOZ, Membre de l'Institut
(Académie des Sciences), Professeur

COURS

Principes simplificateurs dans les mécanismes cérébraux de la perception et de l'action

Le cours a été consacré aux principes simplificateurs qui sous tendent la perception et le contrôle du mouvement. Ces cours ont été donnés respectivement dans les Universités suivantes¹ :

- Massachusetts Institute of Technology : 2 cours, l'un au département de Cognitive et Brain Sciences et l'autre au département d'Astronautics ;
- Département de Neurosciences du California Institute of Technology (Caltech) à Los Angeles : 1 cours ;
- Département de Psychologie de l'Université Santa Barbara : 1 cours ;
- Laboratoire MBARI de Robotique et Biologie Marine à Monterey : 1 cours ;
- Institut de Brain Sciences et à l'Hôpital Neurologique de l'Université de Portland : 2 cours ;
- Département de Computer Sciences et à l'Institut d'étude avancée de Colombie Britannique (Vancouver, Canada) : 3 cours ;
- Département de Psychologie de l'Université de Harvard (Cambridge, USA) : 1 cours.

Dans cette série, nous avons abordé divers volets du problème des principes qui permettent au cerveau de simplifier la « Neurocomputation ».

1. Tous ces cours ont rempli les critères des cours du Collège de France et ont été annoncés comme tels (public large et interdépartemental ou grand public).

Une première catégorie de principes simplificateurs concerne la perception. Nous avons décrit le fonctionnement du système visuel en analysant les mécanismes simplificateurs dans les bases neurales de l'anticipation perceptive, la ségrégation des voies visuelles en modules spécialisés, le contrôle du regard et la relation entre vision et motricité oculaire. Nous avons décrit les travaux expérimentaux de notre laboratoire concernant l'enregistrement intracrânien de l'activité cérébrale chez des patients épileptiques dans les voies visuelles et oculomotrices.

Un des aspects les plus remarquables de la simplification dans les systèmes perceptifs vient des modalités de coopération multisensorielle et du caractère actif de la perception. Nous avons décrit des études sur les mécanismes de la décision de regarder.

Une deuxième catégorie de principes concerne le contrôle de la posture et de la marche. J'ai fait une synthèse des travaux de notre laboratoire. J'ai suggéré que les mêmes lois simplificatrices très générales sont utilisées pour contrôler les trajectoires de la main et les trajectoires locomotrices. J'ai résumé ces lois (co-variation planaire, loi de la puissance $1/3$, séparation du contrôle de la direction et la distance, etc.).

Ensuite, dans plusieurs conférences, j'ai fait une synthèse des travaux sur les référentiels spatiaux pour montrer que le cerveau peut utiliser une variété de référentiels pour le contrôle de l'équilibre et de la locomotion (grâce au système vestibulaire qui crée une plateforme céphalique stabilisé).

J'ai aussi décrit des travaux très récents utilisant l'imagerie cérébrale et la réalité virtuelle concernant différents réseaux du cerveau qui sous tendent la manipulation des référentiels spatiaux et j'ai esquissé une théorie nouvelle que nous élaborons avec des mathématiciens concernant le fait que le cerveau n'utilise pas seulement la géométrie euclidienne mais aussi des géométries affiniées.

L'ensemble de ces travaux et de ces conférences faites devant des publics très variés dans des Universités toutes de très haut niveau m'ont donné l'occasion de confronter mes idées avec des collègues éminents. J'ai dégagé de tout ce travail d'enseignement et de résultats de nos travaux un concept nouveau qui va donner lieu à un livre à paraître au printemps 2009, chez O. Jacob, sous le titre « La simplicité ». J'ai en effet forgé un concept nouveau qui rend compte de ce remarquable travail de l'évolution des organismes vivants pour résoudre des problèmes complexes avec des solutions qui ne sont pas simples mais complexes, car elles supposent souvent en réalité des processus très élaborés, mais qui permettent aux organismes vivants d'agir très vite, avec précision et avec de grandes capacités d'adaptation et de flexibilité. J'ai beaucoup apprécié la possibilité donnée aux Professeurs du Collège de France de donner leur cours à l'étranger car ce « grand tour » d'Universités de haut niveau et la confrontation d'opinions qu'elle a induite a été très fructueuse pour mes recherches et celles de notre laboratoire et, je l'espère, pour ceux qui voudront bien lire mon livre. Elles ont aussi permis d'engager de nouvelles collaborations, en particulier avec l'Université de Vancouver.

SÉMINAIRES

Le cerveau, le réel et le virtuel

Le séminaire du cours a été consacré cette année au thème suivant : « Le cerveau, le réel et le virtuel ». La question du réel est importante et donne lieu aujourd'hui à des approches multidisciplinaires qui vont de la neuropsychologie à la robotique. Cette question a été discutée par des conférences de psychiatres, des spécialistes de l'hypnose, des neurologues. Nous avons aussi accordé une attention particulière à la question de la mémoire autobiographique et les applications de la réalité virtuelle.

Une série de conférences a été donnée par le P^r I. Takanishi sur la robotique humanoïde. En effet, la construction de robots humanoïdes est un champ nouveau de l'intelligence artificielle et donne lieu à des coopérations importantes entre neurosciences et robotique.

— 16 janvier : P^r N. Franck (Institut des Sciences Cognitives CNRS Lyon), « Les hallucinations. Altérations de la prise en compte du réel dans les psychoses » ; D^r M.-O. Krebs & D^r I. Amada (INSERM. Hôpital Sainte-Anne Paris), « Hallucination et schizophrénie ».

— 23 janvier : D^r J. Becchio (Université Paris Sud Orsay), « Données récente sur les bases neurales et les applications cliniques de l'hypnose » ; D^r J.-P. Lachaux (INSERM Lyon), D^r Ph. Kahane (Hôpital Nord, Grenoble) et D^r K. Jerbi (LPPA Collège de France), « Brain TV : voir, contrôler et moduler l'activité de son cerveau. Bases du neurofeedback et des interfaces cerveau-machine ».

— 30 janvier : P^r P. Haggard (Institute of Cognitive Neuroscience University College Londres), « Sensation corporelle et représentation de soi » (en anglais avec traduction française) ; discussion : P^r A. Berthoz et P^r J.-L. Petit, « La notion de corps virtuel ».

— 6 février : P^r L. Manning (Laboratoire de Neuropsychologie CNRS, Université de Strasbourg), « Le réel et la fiction dans la mémoire autobiographique. Etudes comportementales et en imagerie cérébrale » ; P^r P. Piolino (Université Paris V), « A la recherche du temps perdu : bases neurales de la mémoire autobiographique et de ses dysfonctionnements ».

— 13 février : P^r S. Aglioti (Université La Sapienza, Rome), « Le corps et le soi dans le cerveau » ; P^r A. Berthoz, H. Hicheur, J. Grèzes, J. Houben, L. Yahia-Cherif (LPPA Collège de France et Ecole Jacques Lecoq), « L'expression corporelle des émotions ».

— 20 février : P^r D. Thalmann (Ecole polytechnique de Lausanne, Laboratoire de Réalité virtuelle) « La simulation des foules par la réalité virtuelle » ; D^r S. Donikian (IRISA /CNRS Université de Rennes) « Comment s'inspirer des comportements humains pour réaliser des créatures virtuelles avec des images numériques ».

— Béragère Thirioux, LPPA Collège de France. P^r Olaf Blanke, EPFL Lausanne. P^r Gérard Jorland, EHES. P^r A. Berthoz, LPPA. « Danser avec un funambule virtuel : étude en EEG des bases neurales de l'empathie ».

Ces séminaires on été complétés par un Colloque international les 11 et 12 juin 2008, organisé avec les Professeurs Brian Stock (Université de Toronto) et Carlo Ossola (Collège de France), intitulé : « **La pluralité interprétative. Fondements cognitifs de la notion de point de vue** ». Près de 20 orateurs ont présenté des travaux interdisciplinaires. Ce colloque sera publié par O. Jacob dans le cadre des « Travaux du Collège de France ».

**La pluralité interprétative.
Fondements historiques et cognitifs de la notion de point de vue**

Jeudi 12 juin 2008

- Brian Stock (Université de Toronto), **Sources historiques de la pluralité.**
- Alain Berthoz (Collège de France), **La manipulation mentale des points de vue : un des fondements de la tolérance ?**
- Olivier Houdé (Université Paris Descartes et Institut Universitaire de France), **Aux origines du dialogue des cultures chez l'enfant.**
- Edy Veneziano (Université Paris Descartes - CNRS), **Utilisations du langage et développement de la capacité à maîtriser plusieurs points de vue chez l'enfant.**
- Stéphanie Burnett et Sarah Blakemore (University College, Cognitive Neuroscience Center. Londres), **Cognitive development during adolescence.**
- Francisco Jarauta (Université de Murcia), **Dialogue des interprétations : les Tre filosofi de Giorgione.**
- Dan Sperber (Ecole Normale Supérieure. Institut Jean Nicot. CNRS), **Pragmatique de l'interprétation.**
- Carlo Severi (Ecole des Hautes études en Sciences Sociales et Collège de France), **Pluralité de points de vue et culture : réflexions sur le conflit culturel.**
- Sara Cigada (Université de Milan), **L'émotion et la persuasion politique : lectures de Robespierre.**
- Mikkel Wallentin (Center for Semiotics and Functionally Integrative Neuroscience, Aarhus University Hospital, Danemark), **What is it to you? Spatial perspectives in language and brain.**
- Annick Paternoster (Universités de Leeds et Lugano), **Politesse et point de vue dans les dialogues de la Renaissance italienne.**

Vendredi 13 juin

- Michel Tardieu (Collège de France), **Le pluralisme religieux.**
- Barbara Cassin (Centre Léon Robin de Recherche sur la pensée antique. CNRS/Paris IV, ENS), **Relativité de la traduction et relativisme.**
- Jean-Claude Schmitt (Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales), **Visions et voix : une herméneutique médiévale par les gestes, les images et la musique.**
- Carlo Ossola (Collège de France), **Le paradoxe herméneutique.**
- Philippe Mongin (Ecole des Hautes Etudes Commerciales. CNRS), **Waterloo et les miroirs croisés de l'interprétation, de Stendhal à la théorie des jeux.**
- Julie Grèzes (INSERM. ENS), **Bases neurales des relations avec autrui.**
- Roland Jouvent (Université Paris VI - Hôpital de la Salpêtrière), **Les ambiguïtés du jugement.**
- Anne Andronikof (Université Paris X), **Interpréter le discours de l'autre en psychologie clinique : projections et déviances.**
- Heike Jung (Université de la Sarre, Département de Sciences juridiques), **Les formes et modèles du procès pénal - sauvegardes contre la manipulation ?**
- Emmanuel Decaux (Université Paris II), **Universalité des droits de l'homme et pluralité interprétative : l'exemple des droits de l'enfant.**

SÉMINAIRES DIVERS DU LABORATOIRE

— 10 janvier : D^r J. Del R. Millan (IDIAP Research Institute, EPFL, Lausanne Suisse), « Cognitive signals for brain - Computer interaction ».

— 25 et 27 février : P^r A. Takanishi (Professeur à l'Université Waseda de Tokyo, Japon), invité par l'Assemblée des Professeurs, sur la proposition du professeur Alain Berthoz. Deux conférences sur les sujets suivants : 1. Relations entre la robotique des humanoïdes et la culture et la société au Japon. 2. Les robots humanoïdes comme outils pour l'étude scientifique du comportement humain.

— 3 mars : D^r L. Rossini (ESA/ESTEC Netherlands), « Neuro-inspired motor anticipatory interface for teleoperation ».

— 26 mars : P^r A. Sirota (CMBN Rutgers Newark NJ, USA), « Role of oscillations in coordination of activity within and between the neocortex and hippocampus ».

— 12 et 19, 26 juin : P^r G. Buzsaki (Professeur à Rutgers University, Newark, USA) invité par l'Assemblée des Professeurs, sur la proposition du professeur Alain Berthoz, a donné une série de leçons sur Rhythms of the brain : 1. Neuronal synchrony : metabolic and wiring costs of excitatory and inhibitory systems, 2. Neuronal synchrony : oscillatory and non-oscillatory emergence of cell assemblies, 3. Neuronal synchrony : internally advancing assemblies in the hippocampus, 4. Neuronal synchrony : coupling of hippocampal and neocortical systems.

— 30 juin : D^r T. Pozzo (INSERM U887, Dijon), « le codage central de la gravité : approche comportementale et corrélats neuronaux ».

— 3 juillet : D^r E.B. Torres (California Institute of Technology, USA), « Learning movement time from space in the primate Posterior Parietal Cortex ».

TRAVAUX DE RECHERCHE DES ÉQUIPES DU LABORATOIRE

1. APPROCHE PROBABILISTE ET PERCEPTION ACTIVE

1.1. PERCEPTION VISUELLE DES OBJETS ET DU MOUVEMENT

J. DROULEZ, C. MORVAN, C. DEVISME, C. BOUCHENY

Notre équipe étudie la perception des caractéristiques géométriques et dynamiques des objets, notamment dans le contexte de la perception active c'est-à-dire lorsque le sujet est engagé dans une tâche motrice impliquant une interaction forte entre le traitement des informations sensorielles et l'exécution d'une action motrice : mouvement du regard, déplacement de la tête, mouvement de la main. Ces recherches sont organisées autour de 2 thèses, dont une a été soutenue cette année. Elle a également étudié l'influence de la vitesse oculaire pendant la poursuite sur la perception de la direction du mouvement d'une cible visuelle. La thèse de Céline Devisme (contrat Cifre avec Essilor) est centrée sur l'étude des gradients de disparité binoculaires horizontaux et verticaux et leur influence sur la perception du relief en vision périphérique. Ces études permettent de quantifier l'incidence des distorsions induites par le port de verres ophtalmiques. La thèse de Christian Boucheny (codirigée avec Georges-Pierre Bonneau, contrat Cifre EDF) a pour objectif l'étude psychophysique des méthodes de visualisation scientifique,

notamment les techniques de rendu volumique et de restitution cinématique. Il a également mis en place de nouvelles méthodes de visualisation interactive, couplant un oculomètre de précision à des algorithmes de simplification dans le cadre de la visualisation de grandes bases de données tridimensionnelles. Enfin, dans le cadre d'un stage post-doctoral, Camille Morvan a terminé une étude sur l'intégration des signaux rétiniens et de la copie efférente de la commande oculaire dans la perception de la vitesse d'une cible.

1.2. MODÉLISATION BAYÉSIENNE DES COMPORTEMENTS SENSORI-MOTEURS

J. DROULEZ, F. COLAS, S. CAPERN, J. LAURENS

Dans le cadre du programme européen BACS dont l'objectif est de démontrer l'intérêt de l'approche Bayésienne en robotique et pour les sciences cognitives, notre équipe s'intéresse plus particulièrement à l'implémentation de l'inférence bayésienne par des réseaux de neurones biologiquement plausibles et à la modélisation des interactions multi-sensorielles (fusion d'informations) par des réseaux bayésiens auto-adaptatifs. Nous avons développé un modèle bayésien dynamique de la perception du mouvement propre à partir des informations vestibulaires (thèse de Jean Laurens). Dans ce modèle, les caractéristiques dynamiques de la perception du mouvement et les ambiguïtés qui résultent de l'équivalence gravité-inertie sont expliquées par les connaissances *a priori* quantifiées de façon probabiliste. Nous avons également développé un modèle unifié de la perception des objets tridimensionnels à partir des informations visuels (flux optique) et de la connaissance du mouvement propre (signaux vestibulaires et moteurs). Ce modèle permet d'intégrer de façon cohérente les hypothèses de rigidité et de stationnarité et reproduit un grand nombre de résultats psychophysiques (thèse de Francis Colas, codirigée par Pierre Bessière). Enfin, la thèse de Simon Capern est centrée sur la modélisation de la perception du mouvement et des réseaux neuronaux codant les fréquences spatio-temporelles des stimuli visuels. Une revue des modèles de détection du mouvement a été réalisée, ainsi qu'un modèle (en collaboration avec Daniel Bennequin) de la distribution des réponses aux fréquences spatio-temporelles dans V1 qui rend compte des résultats décrits en imagerie optique.

1.3. APPROCHE PROBABILISTE DE LA FUSION D'INFORMATION ET DE L'ANALYSE DE SIGNAUX BIOLOGIQUES

J. DROULEZ, L. FOUBERT, en collaboration avec T. CHAPERON & D. BENNEQUIN

De nouveaux outils probabilistes ont été développés pour la calibration et à l'estimation de la pose de caméra ainsi qu'à l'extraction de données 3D à partir de séquences vidéo dans différentes conditions d'éclairage dans le cadre d'une collaboration avec EDF. Ces algorithmes sont utilisés dans l'interprétation et la numérisation 3D de bâtiments ou de sites préhistoriques (Lascaux) et archéologiques (Delphes). La modélisation par mixture de gaussiennes de la distribution des boutons synaptiques fournit une représentation quantitative dense des données

neuro-anatomiques et un outil précis de détermination des clusters (thèse de Luc Foubert, codirigée par Chantal Milleret). Enfin l'analyse statistique fine du bruit des données d'imagerie optique corticale a permis de proposer de nouvelles méthodes de traitement applicables aux enregistrements en fluorescence voltage-dépendante.

1.4. IMPLEMENTATION DES CALCULS PROBABILISTES

PAR LES INTERACTIONS BIOCHIMIQUES

J. DROULEZ, A. HOUILLON, en collaboration avec P. BESSIÈRE

Les modèles Bayésiens sont particulièrement efficaces pour rendre compte du comportement et de la perception face à des situations incertaines et des stimuli ambigus. Ces modèles supposent que le cerveau est capable de représenter des distributions de probabilités sur des variables pertinentes (forme, mouvement, position, etc.) et d'effectuer des calculs probabilistes sur ces distributions. Une question ouverte est donc de comprendre par quels mécanismes et à quel niveau les probabilités sont codées et manipulées. En collaboration avec Pierre Bessière, nous explorons l'idée selon laquelle les réseaux biochimiques complexes de la signalisation cellulaire sont capables d'effectuer ces tâches computationnelles. Dans le cadre de sa thèse, Audrey Houillon développe cette idée en l'appliquant au fonctionnement des photorécepteurs.

2. INTÉGRATION INTERHÉMISPHERIQUE ET PERCEPTIF SENSORIELLE

C. MILLERET, A. GRANTYN, L. FOUBERT, J. RIBOT.

En collaboration avec S. TANAKA (Riken BSI, Tokyo, Japon), J. DROULEZ (LPPA) et D. BENNEQUIN (Institut de Mathématiques, Université Paris 7).

2.1. MISE AU POINT DE L'UTILISATION DE COLORANTS SENSIBLES AU POTENTIEL DE MEMBRANE POUR L'IMAGERIE OPTIQUE. PREMIÈRES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

L. FOUBERT, C. MILLERET.

En collaboration avec S. TANAKA. (Riken BSI, Tokyo, Japon)

La technique d'imagerie optique permet de mettre en image l'architecture fonctionnelle du cortex tant les domaines spatiaux que temporels. Son principe de fonctionnement est le suivant : une caméra CCD à haute fréquence de rafraîchissement (500 Hz) est placée au-dessus de la préparation et enregistre les variations de réflexion d'une lumière incidente qui varient avec l'activité corticale. En appliquant un colorant fluorescent voltage-sensible sur le cortex, courant 2007, nous avons obtenu des cartes corticales avec une résolution spatiale de 20 μm et une résolution temporelle de 3 ms sur de grandes étendues de cortex, simultanément au niveau des 2 hémisphères, ce qui correspond à une réelle prouesse technique. Tout récemment, nous avons en outre obtenu nos premières cartes transcalleuses au niveau du cortex visuel primaire du chat.

2.2. ANALYSE QUANTITATIVE DES EFFETS D'UNE OCCLUSION MONOCULAIRE PRÉCOCE SUR LA MORPHOLOGIE DES AXONES CALLEUX

L. FOUBERT, C. MILLERET. En collaboration avec J. DROULEZ (LPPA) et D. BENNEQUIN (Institut de Mathématiques, Université Paris 7)

Sur la base de simples observations, nous avons antérieurement montré que : 1) Chez le chat adulte normal (NR), la plupart des terminaisons callosales présentes dans le cortex visuel primaire ont un tronc principal dont le diamètre est compris entre 0,45 et 2,25 μm . Elles sont localisées presque exclusivement dans les couches supragranulaires (II/III) de la bordure entre les aires visuelles primaires 17 et 18 (TZ), avec un nombre relativement limité de boutons synaptiques. L'équipe l'a bien établi en collaboration avec G. Innocenti (Houzel et al., 1994). Nous l'avons confirmé récemment, en combinant imagerie optique et étude anatomique (Rochefort et al., en préparation). 2) Chez le chat adulte ayant subi une occlusion monoculaire précoce (MD), ces mêmes terminaisons calleuses ont un tronc principal de diamètre similaire à ceux des animaux normaux. Mais ils envahissent cette fois très largement TZ, A17 et A18. Parallèlement, le nombre de boutons synaptiques terminaux s'accroît très significativement par rapport à la normale, mais restent toutefois confinés aux couches supragranulaires.

Au cours de l'année qui vient de s'écouler, nous avons tenté de parfaire cette analyse comparative des axones calleux NR et MD par 2 analyses quantitatives sophistiquées de la dispersion globale des branches terminales et des boutons. Par une approximation ellipsoïdale, nous avons montré que : a) La surface corticale occupée par chaque terminaison calleuse chez les animaux MD est en moyenne 2 fois celle qui est observée chez les animaux NR ; b) Le volume occupé par chaque terminaison axonale (= volume de l'ellipsoïde) est également en moyenne deux fois celui qui est occupé chez les animaux NR ; c) Les arborisations terminales se terminent à 80 % dans TZ chez les animaux NR alors qu'elles ne terminent plus qu'à 20 % dans cette même région chez les animaux MD ; d) L'angle général de la distribution des branches terminales et des boutons synaptiques avec TZ est de 70° chez les NR alors qu'il est seulement de 49° chez les MD. Par la seconde méthode quantitative, nous avons aussi montré que l'occlusion monoculaire précoce : a) double l'étendue et le volume de l'arborisation terminale des axones calleux au niveau cortical chez l'adulte ; b) double également le nombre d'amas synaptiques formés par ses arborisations ; c) divise par 10 le rapport entre le volume des amas synaptiques et celui de l'arborisation terminale totale ; en d'autres termes, la densité synaptique est grandement diminuée. Au-delà, ces nouvelles méthodes d'analyse devraient permettre d'établir dans le futur une corrélation assez étroite entre l'anatomie et la fonction cérébrale. Dans le contexte qui nous intéresse, elle devrait beaucoup nous aider à établir une corrélation précise entre les connexions calleuses et les cartes spatio-temporelles qu'elles définissent. Par là même, on devrait mieux comprendre comment le corps calleux contribue à l'élaboration de la perception visuelle.

3. MÉMOIRE SPATIALE ET NAVIGATION

S.I. WIENER, M. KHAMASSI, A. PEYRACHE, V. DOUCHAMPS, K. BENCHENANE, E. TABUCHI (LPPA), en collaboration avec P. TIERNEY, F. BATTAGLIA (Université de Amsterdam)

Afin de mieux comprendre les interactions dynamiques au niveau de structures impliquées dans la planification et la prise de décision au cours de la navigation, nous continuons à employer une double approche comportementale et électrophysiologie. Nous avons continué nos analyses des enregistrements multivoies chez les rats effectuant deux tâches différentes dans le même labyrinthe en forme de Y (trois bras séparés de 120°), chacune faisant appel aux mêmes réponses comportementales et présentant des indices comparables. Mais chacune des tâches implique des types de traitements d'informations différents, qui dépendent des caractéristiques propres des régions impliquées (connexions anatomiques, architecture synaptique et neurochimique). En comparant des réponses de neurones lorsque l'animal met en œuvre différents processus cognitifs, nous déterminons le profil d'activité d'ensemble de neurones correspondant, et l'état de synchronisation entre les structures.

3.1. ANALYSES DE L'ACTIVITÉ D'ENSEMBLES DE NEURONES LORS DE L'APPRENTISSAGE ET ALTERNATIONS DE STRATÉGIE

Les analyses de réactivations jusqu'à présent ne sont pas explicitement reliées à l'apprentissage de la tâche. En effet, il ne s'agit que d'une étude d'activité globale reposant sur des comparaisons de corrélations. Nos approches permettent de comprendre le lien qu'il existerait entre ces réactivations et l'apprentissage *per se*. La première approche à ce problème est d'analyser les corrélats comportementaux des cellules impliquées fortement dans les composantes principales. Des classes de cellules peuvent être ainsi définies selon leurs sélectivités : préparation de l'action, récompense, préférence spatiale, préférence à la position de la lumière, etc. Le travail consistera alors à vérifier et à spécifier l'existence d'invariants (de façon purement spéculative — et à titre d'exemple — il se pourrait que seules les composantes principales recrutant des cellules corrélées à la préparation de l'action et à au résultat de cette action se réactivent). Inversement, dans une approche analytique *a priori*, les composantes principales seront calculées sur des sous-groupes de cellules prédéfinies en fonction de leurs corrélats comportementaux. Il sera alors vérifié si ces composantes principales tendent à se réactiver ou non. De façon assez similaire, la restriction du calcul des composantes principales peut se faire non pas sur les variables (l'activité cellulaire) mais sur des périodes d'intérêt définies de façon *ad hoc* (par exemple les périodes précédant ou suivant la récompense). Finalement, une dernière approche serait de trouver les composantes principales qui maximisent la réactivation (par exemple en calculant les composantes principales sur les périodes de sommeil suivant la tâche) et de regarder les corrélats comportementaux des cellules que les sous groupes cellulaires

se réactivant recrutent. Cette mesure de réactivation ne fournit en rien les détails des mécanismes physiologiques sous-jacents, tout au plus point elle les moments d'intérêt aussi bien pendant le sommeil (maximum de réactivation) que pendant l'éveil. En effet, la mesure de réactivation appliquée au période d'éveil fournit les temps pendant lesquels la mesure « prend » sa valeur (la corrélation est calculé sur une grand période, mais seul certain laps de temps peuvent être cruciaux pour l'établissement d'une corrélation significative). Il sera très intéressant par exemple de regarder l'activité cellulaire pendant les pics de réactivations. Deux possibilités vont être alors possibles : ces pics correspondent à des coactivations ayant lieu toujours dans le même sens (pour deux cellules anti corrélées pendant l'éveil, les pics correspondent toujours à l'activation de l'une et à l'inhibition de l'autre) ou non. S'il s'avère que les coactivations respectent un schéma invariant, l'étude des corrélats comportementaux de ces deux cellules pourrait apporter une information d'un grand intérêt sur la nature de la réactivation. Cependant, cela ne relève pas forcément du mécanisme physiologique. Le sommeil à ondes lentes est caractérisé par des oscillations corticales, thalamo-corticales et hippocampiques tout à fait particulière. Ces phénomènes oscillatoires ne sont pas indépendants et, au contraire, de grandes synchronisations sont observées lors de cette phase de sommeil. L'enregistrement simultané des potentiels de champs locaux dans le cortex préfrontal médian et l'hippocampe va nous permettre de corréler l'activité physiologique aux réactivations. Pour étudier les relations entre les activités de l'hippocampe et du cortex préfrontal par biais des analyses des LFPs, nous étudions les cohérences entre les potentiels de champs locaux dans la bande thêta entre l'hippocampe et le cortex préfrontal. Nos données montrent que les jours ou le rat atteint le critère de réussite de la tâche, on observe une augmentation de la cohérence au point de décision (bifurcation) dans le labyrinthe.

3.2. LE SYSTÈME NORADRÉNERGIQUE DANS LA PLASTICITÉ DES RÉSEAUX NEURONAUX LORS DE LA REMÉMORATION ET DE LA RECONSOLIDATION

Susan J. SARA, DRI (EMERITA)

L'apprentissage modifie le pattern de sommeil consécutif chez le Rat, et augmente la densité des fuseaux dans l'EEG cortical. Au niveau de l'hippocampe, nous avons observé une augmentation du taux des oscillations à haut fréquence (ripples) (Eschenko et al., 2008). De plus, il y a une augmentation systématique du taux de décharge des neurones noradrénergiques du LC pendant le SWS, 2 h après l'apprentissage (Eschenko & Sara, 2008). Les décharges des cellules du LC sont synchronisées avec les oscillations lentes et les spindles au niveau du cortex préfrontal. On peut donc estimer que le LC est, avec l'hippocampe et le néocortex, un acteur important dans le traitement « off-line » des nouvelles informations, pendant le SWS. Nous évaluons maintenant la relation entre les décharges neuronales du LC et l'activité en ripples au niveau de l'hippocampe (en collaboration avec Adrien Peyrache, O. Eschenko, Max Planck Institute for Biological Cybernetics). A la lumière de ces résultats impliquant le système noradrénergique

dans le traitement d'information pendant le SWS, nous évaluerons la relation entre le décharge des neurones du LC et le « replay » des configurations d'activations des ensembles de cellules au niveau hippocampique et corticale. Le couplage avec l'enregistrement des ensembles, déjà pratiqué au sein de l'équipe, permettra d'élargir et approfondir nos connaissances sur la manière dont s'effectuent les interactions entre les réseaux neuronaux lors de l'apprentissage et la mise en mémoire, ainsi que le rôle facilitateur du système noradrénergique dans ces interactions.

4. MÉMOIRE SPATIALE ET CONTRÔLE DU MOUVEMENT

4.1. PHYSIOLOGIE DE L'ACTION ET PHÉNOMÉNOLOGIE

J.-L. PETIT (Université de Strasbourg), A. BERTHOZ (LPPA)

L'ouvrage paru à l'automne 2006 (traduction anglaise à Oxford University Press 2008) a mis en place une interprétation de la physiologie de l'action dans la perspective du dernier Husserl. Renonçant à faire reposer le sens propositionnel sur les capacités théorique et linguistique du sujet pensant, Husserl enracinait le sens du monde vécu de l'agent humain dans les systèmes kinesthésiques de son organisme. L'originalité de l'approche de la perception par la physiologie de l'action ressortait ainsi clairement par rapport à l'idéologie de la cognition à base de représentation et de transformation d'information externe. Étaient du même coup posés de nouveaux problèmes que nous avons traités en répondant à diverses invitations à des conférences dans des congrès internationaux. Quelle contribution les mécanismes fonctionnels du système nerveux peuvent-ils apporter au sens des actions pour l'agent lui-même ou un partenaire ? La découverte des systèmes résonnants du cerveau va-t-elle relancer le mouvement de naturalisation des sciences sociales en donnant la clé de l'empathie, de l'imitation et de la formation des entités collectives ? La théorie des « actes de parole » (Austin-Searle-Vanderveken) qui repose sur l'interprétation des actes sociaux en termes d'attitudes propositionnelles — donc de proposition — pourra-t-elle retrouver la dimension posturale des attitudes en renouant avec l'action ? Les données sur les corrélats neuraux de la préférence et du jugement de valeur suffisent-elles à combler le fossé entre l'être naturel et le devoir être ? A toutes ces questions la phénoménologie laisse entrevoir une réponse cohérente, sinon unique, sur la base des affinités entre son analyse du vécu et la conception du dynamisme fonctionnel du cerveau comme théâtre d'un « effort de l'être vers le sens ». Contre la croyance en l'existence d'un seuil du sens ou d'une frontière entre non sens et sens, nous avons donc travaillé à une conception de la gradation continue du « faire sens » depuis les valeurs biologiques dont se chargent les patrons d'activité fonctionnelle des circuits cérébraux jusqu'aux actes intentionnels orientés vers un but et accessibles à l'expression dans le langage naturel.

4.2. MODÈLES COMPUTATIONNELS CONTRACTANTS DES CIRCUITS SACCADIQUES : DU TRONC CÉRÉBRAL AU CORTEX

B. GIRARD, N. TABAREAU, A. BERTHOZ, en collaboration avec D. BENNEQUIN (Institut de Mathématiques, Paris 7) & J.-J. Slotine (NSL, MIT USA)

Les saccades oculaires sont un objet d'étude privilégié en neurosciences, qui a donné lieu à de nombreux allers-retours entre modélisateurs et expérimentateurs depuis plus de 30 ans. La génération de saccades implique l'activation de nombreux circuits neuronaux sous-corticaux (formation réticulée, colliculus supérieur, cervelet, ganglions de la base) et corticaux (champs oculaires frontaux, cortex intra-pariétal latéral, etc.). La richesse des données accumulées permet d'envisager la modélisation de l'ensemble de ces circuits. Un tel modèle a été proposé dans une série de travaux menés par l'équipe de Dominey et Arbib au début des années 90, cependant, de nombreux résultats expérimentaux récents suffisent à en justifier une mise à jour. Au-delà de cette simple mise à jour, ce projet de recherche a pour objectif d'évaluer, dans le cas concret et très documenté des circuits saccadiques, l'idée proposée par Slotine et Berthoz que la théorie de la contraction (Lohmiller et Slotine, 1998) peut aider à comprendre la stabilité de fonctionnement du cerveau.

4.2.1. Génération des mouvements saccadiques

Le colliculus supérieur a un rôle central dans l'exécution des mouvements saccadiques, il est composé d'un empilement de cartes rétino-topiques encodant la position des cibles dans le champ visuel. Ces cartes ont des géométries particulières : linéaires ou logarithmiques-complexes. Une étude de l'élaboration de la commande saccadique dans le colliculus supérieur et la formation réticulée (Tabareau et al., 2007) a permis la mise en place d'une preuve mathématique fondée sur des données neurobiologiques reliant cette élaboration à la géométrie des cartes. Un nouveau schéma de recollement a été proposé et s'est montré capable de corriger les erreurs systématiques de la méthode standard proposée par van Gisbergen et al. (1987). Ce modèle a été conçu comme contractant. Une implementation robotique préliminaire a été menée en collaboration avec le laboratoire ARTS (Scuola Superiore Sant'Anna, Pise) dans le cadre du projet Neurobotics (Manfredi et al. 2006).

4.2.2. Sélection de l'action

B. GIRARD, N. TABAREAU, Q.C. PHAM, A. CONINX, A. BERTHOZ (LPPA), en collaboration avec J.J. SLOTINE (NSL, MIT)

Les ganglions de la base sont un ensemble de noyaux sous-corticaux interconnectés formant des boucles parallèles avec le cortex frontal. Ils semblent impliqués dans des processus généraux de sélection, guidés par apprentissage par renforcement. Nous avons proposé un nouveau modèle de ces boucles, intégrant des connexions entre noyaux usuellement négligées, doté d'une capacité de sélection supérieure à celle du précédent modèle de (Gurney et al., 2001a,b) et capable d'amplification sélective du signal cortical (Girard et al., 2005, 2006). Nous avons également démontré la contraction des /locally projected dynamical systems / (IPDS) introduits

par (Dupuis et Nagurney, 1993) et avons proposé de les utiliser comme nouveau modèle de neurones artificiels (Girard et al., 2008). Le modèle contractant résultant a été appliqué à la résolution d'une tâche standard de survie en robotique autonome, afin de montrer son efficacité en tant que Système de sélection de l'action.

4.2.3. Modèle Bayésien de la sélection de saccades

F. COLAS, F. FLACHER, B. GIRARD, A. BERTHOZ (LPPA),
en collaboration avec P. BESSIÈRE (LIG, INRIA, Grenoble), L. CANTO Pereira,
T. TANNER et C. CURIO (MPI, Tübingen)

Afin d'étudier le rôle de la prise en compte explicite de l'incertitude dans les processus de sélection de l'action, un modèle de sélection de cibles pour les mouvements des yeux formalisé dans le cadre de la programmation bayésienne est en cours de développement. Il est fondé sur des cartes d'occupation reprenant la géométrie du colliculus supérieur. Parallèlement, une nouvelle tâche expérimentale, inspirée du protocole MOT (Multiple Object Tracking) de Pylyshyn, mais réalisée avec un champ de vision plus large et avec les yeux libres de bouger a été proposée. Des mesures de mouvements des yeux dans cette tâche ont été menées, ces données sont utilisées au LPPA pour tester et ajuster les paramètres du modèle. Ce travail est intégré au projet européen Bayesian Approach to Cognitive Systems (BACS).

4.3. CONTRIBUTIONS SENSORIELLES POUR LA PERCEPTION DU MOUVEMENT

M. VIDAL, A. CAPELLI (LPPA), en coopération avec P. PRETTO,
H. BÜLTHOFF (MPI, Tübingen)

Ces travaux de recherches s'inscrivent dans le cadre général de l'étude de la perception du mouvement. Lorsque nous nous déplaçons, nous disposons d'un ensemble d'informations qui sont traitées par le cerveau et renseignent sur notre mouvement relatif et notre position dans le monde.

4.3.1 Perception des vitesses lors de mouvements propres visuels

M. VIDAL, en collaboration avec P. PRETTO et H.H. BÜLTHOFF (MPI)

Le traitement du flux optique joue un rôle fondamental dans l'analyse de notre mouvement. Je travaille actuellement en collaboration avec Paolo Pretto au MPI à Tübingen, sur un projet cherchant à caractériser l'extraction de la vitesse propre lors de translations visuelles sur un plan. Je m'intéresse dans ce projet aux informations visuelles non localisantes, en d'autres termes j'exclue l'utilisation de toute stratégie cognitive de navigation reposant sur des repères visuels pour la perception du mouvement. La relation entre la vitesse angulaire (rétinienne) et linéaire (égocentrique) n'est pas triviale, et pourtant le monde que nous percevons ne se déforme pas lorsque nous nous déplaçons. Nous avons mené une série d'expériences avec l'écran panoramique du Max Planck Institute ($240^\circ \times 120^\circ$ de champ) afin de caractériser le mécanisme de compensation de l'inclinaison du regard et l'influence de la zone visuelle disponible (champ de vision total, vision centrale, vision périphérique), et du contraste. Ce dernier point, sujet de débats

dans la littérature, présente un intérêt majeur pour les simulateurs de conduite lors de la reproduction de situations accidentogènes provoquées par le brouillard. Les résultats préliminaires montrent une amélioration du mécanisme de compensation rétino-topique vers égocentrique pour la perception des vitesses lors du stimulation large champs, mais aussi lorsque les yeux peuvent accompagner le mouvement.

4.3.2 Perception et mémorisation de mouvements visio-vestibulaires

M. VIDAL, A. CAPELLI, en collaboration avec H.H. BÜLTHOFF (MPI)

Des informations inertielles sont fournies par le système vestibulaire et les organes internes et des informations de position sont fournies par la proprioception. De nombreuses études sur le rôle des informations vestibulaires dans la perception du mouvement ont été réalisées au LPPA dans le passé. Dans le cadre d'un projet Européen Moves, nous étudions comment les informations internes (vestibulaires et proprioceptives) se combinent avec le flux optique pour créer un percept de mouvement propre. L'objectif est de déterminer quelle sera la contribution respective de chacune des modalités et en particulier s'il y a une intégration continue avec les informations visuelles ou juste une prise en compte ponctuelle des informations vestibulaires. Des travaux préliminaires ont déjà été effectués par M. Vidal au MPI, afin d'étudier le cas de rotations en lacet dans un contexte visio-vestibulaire. Les résultats mettent en évidence une dominance visuelle dans l'intégration sensorielle pour la perception de rotations pures.

4.3.3 Estimation du temps restant avant l'impact lors de mouvements propres

A. CAPELLI, M. VIDAL

Peu d'études ont mis en évidence l'utilisation des informations d'accélération de l'objet pour l'estimation du Temps restant avant l'impact (TTC) dans les tâches d'interception (Rosenbaum, 1975 ; McIntyre et al., 2001). Dans ces études, la tâche consistait à estimer le TTC entre un observateur et un objet en mouvement accéléré vers lui. Nous avons examiné si à partir de stimulations visuelles seules, l'information d'accélération peut être extraite afin d'effectuer correctement l'extrapolation du mouvement et donc l'estimation du TTC. Nous avons utilisé l'écran courbe du LPPA (185° de champ horizontal). La tâche du sujet était de préciser à quel moment il atteindrait un drapeau placé devant lui sur chemin, et vers il était visuellement déplacé. Les résultats indiquent une prise en compte de l'accélération dans l'extrapolation du mouvement propre, mais dans le cas de mouvements décélérés, il semblerait que l'estimation soit basée sur des informations de 1^{er} ordre (prologation de la dernière vitesse). Nous envisageons également d'étudier l'estimation du temps restant avant l'impact lors de stimulations visio-vestibulaires car la mesure de l'accélération par nos capteurs vestibulaires pourrait venir compléter les informations visuelles afin d'améliorer les estimations du TTC établies à partir de celles-ci.

4.4. INFLUENCE DES STIMULATIONS VISUELLES ET HAPTQUES SUR LA REPRÉSENTATION DU SCHÉMA CORPOREL

I. OLIVE & A. BERTHOZ

Nous cherchons à savoir le rôle de la plasticité rapide du schéma corporel humain dans le processus de substitution sensorielle visuo-haptique. Notre protocole expérimental consiste dans l'adaptation des manipulations portant sur l'induction de la plasticité rapide et réversible du schéma corporel humain, tels que l'illusion de la Main en Caoutchouc (Rubber Hand illusion). Nous y introduisons un component sensorimoteur afin d'évaluer le potentiel rôle de l'agencivité et des processus efférents dans la modulation des processus de plasticité rapide du schéma corporel humain. Notre protocole expérimental en psychophysiologie évalue les effets comportementaux de l'individu confronté à un conflit de caractère multisensoriel visuo-haptique fondé sur l'introduction d'une incongruité spatiale entre l'endroit d'acquisition du retour d'effort haptique et la localisation visuelle de ce même endroit. Cette incongruité est censé provoquer une modulation et/ou une déviation de la localisation du retour d'effort haptique au-delà des limites du schéma corporel envahissant l'espace péripersonal de l'individu. Une telle déviation est corrélée directement à la plasticité rapide et réversible du schéma corporel humain, en représentant, en conséquence, son indice.

4.5. BASES NEURALES DE LA PERCEPTION DES ACTIONS, INTENTIONS ET ÉMOTIONS D'AUTRUI

J. GREZES (LPPA), Collaborateurs : Professeur A. BERTHOZ, S. PICHON, L. POUGA, F. FRUCHART, C. BAYETTI (LPPA CNRS Collège de France, Paris), Professeur B. DE GELDER (Donders Lab for cognitive and affective neuroscience, Tilburg University, The Netherlands), D^r S. BERTHOZ (Service de Psychiatrie de l'adolescent et du jeune adulte, Institut Mutualiste Montsouris, Paris), D^r B. WICKER (Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée-INCM, CNRS, Marseille), D^r C. CALMELS (INSEP, Paris)

Notre projet de recherche porte sur la perception et la compréhension des comportements moteurs réalisés par autrui, qui jouent un rôle crucial dans la communication et l'interaction sociale. Le but est de décrire les mécanismes cognitifs et d'identifier les corrélats neuroanatomiques qui sont impliqués dans les capacités à comprendre la signification du comportement d'autrui, à détecter les intentions et les émotions qui sont à l'origine de ce comportement et qui leurs sont associés. Ce projet combine des approches, comportementales et des techniques de neuro-imagerie fonctionnelle (IRMf) chez le sujet normal et pathologique.

4.5.1. La perception des actions d'autrui

La perception d'une action est associée à des activations au sein de régions cérébrales connues pour leurs rôles dans préparation et l'exécution d'une action, en particulier le cortex prémoteur et le cortex pariétal (Grèzes et al. 2003). Ces structures sont activées de façon plus prononcée lorsque le sujet est capable de

reproduire, par rapport à une action n'appartenant pas à son répertoire moteur (Calvo-Mérino et al. 2004, Calvo-Merino et al. 2006). En collaboration avec le D^r C. Calmels, un projet actuellement en cours a pour but d'examiner si ce phénomène de résonance motrice est activé chez des sportifs de haut niveau blessés, sachant que ceux-ci sont temporairement dans l'incapacité de réaliser certains gestes en utilisant la technique d'IRMF. La gymnastique artistique a été choisie car c'est une des rares disciplines sportives où un/une athlète blessé(e) au membre supérieur (membre inférieur) peut poursuivre son entraînement en réalisant des mouvements sollicitant les membres inférieurs (membres supérieurs). Des films ont été réalisés, édités, validés. L'expérience en IRMF a débuté en septembre 2007. Une meilleure connaissance du mode de fonctionnement du système résonance motrice pourrait avoir des implications directes par exemple dans le cadre de la rééducation.

4.5.2. La perception des expressions corporelles émotionnelles d'autrui

Cette partie du projet, en collaboration avec le Professeur Alain Berthoz, le Professeur Béatrice De Gelder, Swann Pichon et Lydia Pougá, a pour but d'étudier les bases neurales associées à la perception d'expressions corporelles d'émotions (peur et colère) et de tester le couplage entre émotion et action. Les résultats des deux premières études en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle suggéraient que la perception d'expressions corporelles de peur et de colère, par rapport à une expression neutre, engage une étape supplémentaire, celle de se préparer à agir en réaction à l'émotion perçue (Grèzes et al. 2007, Pichon et al. 2007). Une même étude sur la peur a été réalisée chez des sujets sains et des sujets autistes — Asperger en collaboration avec le D^r Bruno Wicker. Nous montrons qu'il existe des différences cérébrales au sein de la population normale entre des sujets ayant des difficultés à identifier et à exprimer leurs émotions, sujets dits « alexithymique » et les autres au sein de l'amygdale, région ayant un rôle crucial dans l'évaluation émotionnelle, ainsi que dans le cortex cingulaire antérieur qui joue un rôle dans la régulation émotionnelle (Pougá et al., en préparation). Enfin, seuls les témoins par rapport aux sujets autistes présentent des activations au sein du système émotionnel (amygdale, gyrus frontal inférieur et cortex prémoteur ; Grèzes et al, soumis).

4.6. PLANIFICATION ET CONTRÔLE DE LA LOCOMOTION CHEZ L'HOMME

H. HICHEUR (Hertie Institut, Allemagne), A. Crétual, A.-H. OLIVIER (Université de Rennes), J. WIENER (Freiburg University, Allemagne), J.-P. LAUMOND (LAAS, Toulouse), D. BENNEQUIN (Université Paris VI), J.-J. SLOTINE (MIT)

Nos recherches actuelles portent principalement sur l'exploration des principes biologiques et mathématiques sous-tendant la formation des trajectoires locomotrices chez l'homme. Nous nous intéressons par exemple à la locomotion exécutée dans diverses conditions expérimentales (avec/sans vision de la cible, en marche avant/arrière, vitesse lente/rapide,...) afin de dégager l'influence des modalités sensorielles et motrices sur la formation des trajectoires complexes. En

partant de ces observations expérimentales, nous construisons des modèles mathématiques qui font intervenir des principes tels que le contrôle optimal stochastique ou la géométrie affine et équi-affine.

Un autre axe de recherche que nous poursuivons est l'étude de systèmes dynamiques avec la théorie de la Contraction Nonlinéaire. Nous sommes en particulier entrain de développer une version stochastique de cette théorie. Du point de vue des applications, nous étudions par exemple la stabilité des réseaux de neurones synchronisés soumis à des perturbations aléatoires.

4.7. NAVIGATION HUMAINE DANS DES ENVIRONNEMENTS COMPLEXES : CONTRIBUTION DES INDICES KINESTHÉSIQUES ET EFFET D'*A PRIORI* M. LAFON, J. WIENER, A. BERTHOZ

L'objectif est d'étudier les stratégies cognitives de navigation de l'homme. L'originalité de ce travail réside dans la définition et l'étude des kinesthèses ou indices du mouvement. De plus, ce travail s'appuie sur des protocoles expérimentaux nouveaux : l'utilisation d'informations présentées préalablement à l'apprentissage d'un environnement, l'introduction d'incertitude spatiale dans l'étude de la planification de trajet, l'utilisation de modifications posturales pour l'étude des kinesthèses. La thèse est également le résultat d'échanges entre le monde industriel et le monde académique. Lors des deux premières expériences, nous avons pu tester l'effet d'un amorçage de type carte sur un apprentissage kinesthésique d'un trajet. Nous avons demandé au sujet de réaliser plusieurs tâches d'orientation et de navigation pour nous rendre compte de l'interaction possible entre les représentations mais aussi entre les stratégies. Nous concluons que l'effet de l'amorçage sur un apprentissage kinesthésique d'un trajet est très différent suivant le type de tâche demandée, et que certains *a priori* biologiques influencent notre représentation de l'espace. Lors d'une troisième expérience, nous avons étudié l'effet d'un changement postural et de l'habituation sur le maintien d'un pattern locomoteur. Une quatrième expérience nous a permis de montrer que la planification avec incertitude d'un trajet connu était réalisée de manière extrêmement performante par les sujets, et nous avons étudié le rôle des kinesthèses lors de cette planification de trajet. Enfin, une cinquième expérience met en évidence les contributions relatives des informations visuelles géométriques et de type « amers visuels ». Le mémoire se termine sur les études effectuées dans un contexte industriel. La discussion de ce travail se focalise sur l'interaction possible des représentations de l'espace et des stratégies associées puis ouvre sur les questions théoriques que pose la thèse.

4.8. ÉTUDE DU CHANGEMENT DE PERSPECTIVE VISUELLE DANS LA NAVIGATION SPATIALE HUMAINE L. LAOU, J. BARRA, A. BERTHOZ (Projet Européen Bacs) (Projet SCAN, en coopération avec ARCHIVIDEO)

Nous utilisons principalement deux types de perspective visuelle pour mémoriser un trajet dans l'espace : la perspective route et la perspective survol. La perspective

route (ou perspective égocentrée) correspond à la vision de l'espace en trois dimensions telle qu'un individu la perçoit lorsqu'il se déplace physiquement dans un environnement. La perspective survol (ou perspective allocentrée) correspond quant à elle à une vue aérienne ou de type carte de l'environnement, c'est-à-dire à une vision de l'espace en deux dimensions. Les représentations de type route utilisent un cadre de référence égocentré dans lequel la localisation d'un objet se fait par rapport à celle de l'individu, tandis que les représentations de type survol sont construites dans un cadre de référence allocentré basé sur les relations spatiales entre les repères. Sur le plan comportemental, il a été montré que ces deux types de perspective pouvaient engendrer des connaissances et des performances différentes. Sur le plan neural, nous avons montré que deux réseaux partageant certaines aires cérébrales étaient impliqués dans ces deux stratégies (égocentrée et allocentrée) et que ces dernières pouvaient être mémorisées en parallèle. Actuellement, nos travaux de recherche portent sur l'effet du changement de perspective sur les performances de navigation dans une ville virtuelle (collaboration avec Archividéo et Clarté). Nous cherchons également à mieux caractériser les corrélats neuro-anatomiques des stratégies égocentrée et allocentrée en utilisant l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf, collaboration avec NeuroSpin). De plus, un objectif complémentaire de nos travaux consiste à rechercher l'existence de différences entre les hommes et les femmes tant au niveau des stratégies de navigation que des régions cérébrales impliquées.

4.9. EMPATHIE ET REFERENTIELS SPATIAUX

B. THIRIOUX, P^r JORLAND (EHES) & A. BERTHOZ (LPPA),
en coopération avec O. BLANKE (EPFL, Lausanne)

Au cours d'expériences en électroencéphalographie, menées en collaboration avec le P^r Blanke (EPFL, Suisse), nous avons réutilisé notre paradigme de symétrie par rotation et réflexion, élaboré en 2006 (Thirioux et al., soumis) pour explorer les mécanismes neurocognitifs du changement de perspective lors d'une interaction spontanée avec autrui (Jorland et Thirioux, 2008, sous presse). Nos résultats montrent que lors d'une interaction sans tâche explicite avec un avatar présenté de face, profil ou dos, les sujets prennent spontanément la perspective visuo-spatiale de celui-ci, par une transformation mentale du corps, reflétée dans le comportement par une symétrie par rotation. Ce changement de perspective spontané active bilatéralement la jonction temporo-pariétale vers 500-600 ms, 450-550 ms et 400-500 ms après l'onset du stimulus, en fonction de la présentation de face, de profil ou de dos de la funambule, confirmant l'effet de rotation. En fonction de l'augmentation du degré de translation spatiale nécessaire à la transformation mentale, on observe une activation prédominante de la TPJ droite mais aussi une activation sélective du lobule pariétal inférieur gauche pour l'orientation de face. Une tâche imposée de symétrie par réflexion active les systèmes résonnants, en particulier le cortex dorsolatéral préfrontal droit et les aires prémotrices droites, selon un axe antéro-postérieur en fonction de l'orientation de l'avatar, mais aussi, de façon sélective le cortex occipital droit pour l'orientation de face (Thirioux et al., 2008a, en

préparation pour *Journal of Neuroscience*). Une nouvelle analyse a montré qu'un changement de perspective spontané, semblable à un changement de perspective imposé dans une phase tardive des PE (entre 400 et 600 ms), s'en distingue cependant entre 70-100 ms après l'onset du stimulus, activant l'insula gauche alors que la rotation imposée active l'insula droite (Thirioux et al., 2008b, en préparation pour *Nature Neuroscience*). Ces résultats indiquent une activation très précoce des régions impliquées dans l'utilisation des référentiels spatiaux. Enfin une dernière analyse révèle le dynamisme des changements de référentiels spatiaux précédant la stratégie définitive (rotation ou réflexion). Pour l'orientation de face, les résultats montrent une activation des systèmes résonants entre 0 et 500 ms, précédant le changement de perspective spontané. On observe le pattern inverse pour l'orientation de dos. Ces résultats montrent que les sujets, pour la mise en place de leur stratégie d'interaction avec autrui, passent de leur propre perspective visuo-spatiale à celle d'autrui, suggérant qu'une identification avec autrui, non observable dans le comportement, précéderait neurophysiologiquement le changement de perspective et la distinction avec autrui.

4.10. DYNAMIQUE DES CHANGEMENTS DE PERSPECTIVE

DANS LA NAVIGATION HUMAINE

E. DUPIERRIX, A. BERTHOZ, Projet MATISS, en coopération avec RENAULT

La navigation humaine est une activité complexe nécessitant la manipulation simultanée ou successive de différentes perspectives de l'environnement, comme le point de vue « route » ou le point de vue « survol ». Le point de vue route (ou égocentré) coïncide à la perspective perçue par l'individu lorsqu'il se déplace physiquement dans l'espace tandis que le point de vue survol (ou perspective allocentrée) correspond à une vue aérienne de l'espace. Si les recherches se sont centrées sur les processus liés à la manipulation de ces deux stratégies spatiales, très peu d'études ont concerné les mécanismes liés au changement de stratégies. Notre projet de recherche vise à étudier la dynamique des changements de stratégies spatiales pour la navigation humaine. Il s'agit plus particulièrement de caractériser (décours temporel, coût de traitement, corrélats neuronaux) les processus sous-jacents au changement de point de vue en combinant les méthodes comportementales et d'imageries cérébrales (EEG).

4.11. CONSÉQUENCES PERCEPTIVES ET MOTRICES DES ASYMÉTRIES CÉRÉBELLEUSES ET VESTIBULAIRES DANS LA SCOLIOSE IDIOPATHIQUE

D. ROUSIE (Université de Lille), A. BERTHOZ, (Projet de la Fondation Cotrel)

Dans une étude précédente, nous avons démontré qu'il existait chez les sujets scoliotiques une asymétrie statistiquement significative de la base postérieure du crâne reflétant une asymétrie cérébelleuse sous-jacente. Nous avons également mis en évidence un lien direct entre ces asymétries et la présence de malformations au niveau des canaux semi-circulaires de l'oreille interne grâce à une modélisation réalisée à partir de données IRM. Pour vérifier une implication neurophysiologique de ces anomalies, une étude oculomotrice approfondie des sujets scoliotiques a été

menée : elle a permis de mettre en évidence des torsions et des anomalies des poursuites oculaires relevant de dysfonctions vestibulaires. Par ailleurs, des études expérimentales récentes ont mis en évidence des liens génétiques entre la formation du cervelet et de l'oreille interne. Ces premiers résultats suggèrent de nouveaux axes de recherche. Ceux-ci ont reçu le soutien de la Fondation Yves Cotrel en novembre 2007 pour une durée de trois ans.

1. Axe génétique : une collaboration avec le Professeur Nancy Miller, également membre de la fondation Y.Cotrel, a été mis en place. Elle a pour but l'identification des gènes codant pour la formation de l'oreille interne et du cervelet chez l'homme puis la comparaison des loci identifiés entre sujets scoliotiques et sujets sains.

2. Axe neurophysiologique : au niveau vestibulaire et cérébelleux : nous avons, dans la première étude focalisé notre attention sur les canaux semi-circulaires. Il est maintenant indispensable de nous intéresser à la fonction otolithique également impliquée dans la fonction posturale (études de Lacour, de Pompeiano, de De Waele...). Des travaux récents sur le cervelet (Ito) ont ciblé des fonctions cognitives insoupçonnées du cervelet (représentation spatiale, perception du schéma corporel... en plus des fonctions classiques de régulation motrices) : de nouveaux tests d'appréciation de la fonction cérébelleuse vont donc être utilisés. Au niveau oculaire, les anomalies oculomotrices que nous avons mises en évidence dans la première étude doivent être poursuivies notamment au niveau des poursuites oculaires. Cette partie de l'étude sera assurée par le Docteur Salvetti, ophtalmologiste en charge des bilans oculaires des sujets.

ACTIVITÉS DE LA CHAIRE

Publications

Publications de l'équipe : Mémoire spatiale et contrôle du mouvement Responsable : Alain Berthoz

Revue à comité de lecture

2007

— CAPELLI, A., DEBORNE, R., ISRAËL, I. : Temporal intervals production during passive self-motion in darkness, *Current Psychology Letters*, 22 (2).

— HICHEUR, H., PHAM, Q.-C., ARECHAVALETA, G., LAUMOND, J.-P., BERTHOZ, A. : The Formation of Trajectories during Goal-Oriented Locomotion in Humans. I. A Stereotyped Behavior, *European Journal of Neuroscience*, 26(8) : 2376-90.

— KHONSARI, R., LOBEL, E., MILEA, D., LEHERICY, S., PIERROT-DESEILLIGNY, C. & BERTHOZ, A. : Lateralized parietal activity during decision and preparation of saccades, *Neuroreport.*, 18(17) : 1797-800.

— LACHAUX, J.-P., JERBI, K., BERTRAND, O., MINOTTI, L., HOFFMANN, D., SCHOENDORFF, B. & KAHANE, P. : A Blueprint for Real-Time Functional Mapping via Human Intracranial Recordings ?, *PLoS ONE*, 2(10) : e1094.

- LAMBREY, S., AMORIM, M.A., SAMSON, S., NOULHIANE, M., HASBOUN, D., DUPONT, S., BAULAC, M. & BERTHOZ, A. : Distinct visual perspective taking strategies involve differently the left and right MTL structures, *Brain*, Feb 2008 ; 131(2) : 523-34.
- LAMBREY, S. & BERTHOZ, A. : Gender differences in the use of external landmarks versus spatial representations updated by self-motion, *J. Intergr. Neurosc.*, 6(3) : 379-401.
- MILEA, D., LOBEL, E., LEHERICY, S. LEBOUCHER, P., POCHON, J-B., PIERROT-DESSELLIGNY, C. & BERTHOZ, A.(2007) : Prefrontal cortex is involved in internal decision of forthcoming saccades, *NeuroReport*, 18(12) : 1221-4.
- PETIT, J.-L. : Commentary to Helena De Preester : The deep bodily origins of the subjective perspective : models and their problems ?, *Consciousness and Cognition*, 16(3) : 604-18.
- PHAM, Q.-C., HICHEUR, H., ARECHAVALETA, G., LAUMOND, J.-P., BERTHOZ, A. : The Formation of Trajectories during Goal-Oriented Locomotion in Humans. II. A Maximum Smoothness Model, *European Journal of Neuroscience*, 26(8) : 2391-2403.
- SCHMIDT, D., KRAUSE, B.J., WEISS, P.H., FINK, G.R., SHAH, N.J., AMORIN, M.A., MULLER, H.W. & BERTHOZ, A. : Visuospatial working memory and changes of the point of view in 3D space, *NeuroImage*, 36(3) : 955-68.
- TABAREAU, N., BENNEQUIN, D., BERTHOZ, A., SLOTINE, J.-J. and GIRARD, B. : Geometry of the superior colliculus mapping and efficient oculomotor computation, *Biological Cybernetics*, 97(4) : 279-92.
- VAN HEIJNSBERGEN, C.C.R.J., MEEREN, H.K.M., GRÈZES, J., DE GELDER, B. : Rapid detection of fear in body expressions, an ERP study, *Brain Research*, 1186 : 233-41.

2008

- GIRARD, B., TABAREAU, N., PHAM, Q.C., BERTHOZ, A. & SLOTINE, J.-J. : Where Neuroscience and dynamic system theory meet autonomous robotics : a contracting basal ganglia model for action selection. *Neural Networks*, 21(4) : 628-641.
- LAMBREY, S., AMORIM, M.A., SAMSON, S., NOULHIANE, M., HASBOUN, D., DUPONT, S., BAULAC, M., BERTHOZ, A. : Distinct visual perspective-taking strategies involve the left and right medial temporal lobe structures differently. *Brain.*, 131 (Pt 2) : 523-34.
- MOSSIO, M., VIDAL, M., & BERTHOZ, A. : Traveled distances : New insights into the role of optic flow, *Vision Research*, 48, 289-303.
- WIENER, J.M., LAFON, M., BERTHOZ, A. : Path planning under spatial uncertainty. *Mem Cognit.*, 36(3) : 495-504.

Publications de l'équipe « Perception et exploration actives des objets » Responsable : Jacques Droulez

Revue à comité de lecture

2007

- COLAS, F., DROULEZ, J., WEXLER, M. & BESSIÈRE, P. : A unified probabilistic model of the perception of three-dimensional structure from optic flow, *Biological Cybernetics*, 97(5) : 461-77.

2008

— BULLOT, N. & DROULEZ J. : Keeping track of invisible individuals while exploring a spatial layout with partial cues : location-based and deictic direction-based strategies, *Philosophical Psychology*, 21(1) : 15-46.

— DEVISME, C., DROBE, B., MONOT A. & DROULEZ, J. : Stereoscopic depth perception in peripheral field and global processing of horizontal disparity gradient pattern, *Vision Research*, 48(6) : 753-64.

**Publications de l'équipe : Développement perceptif et intégration
interhémisphérique
Responsable : Chantal Milleret**

Revue à comité de lecture

2007

— ROCHEFORT, N., BUZAS, P., KISVARDAY, Z., EYSEL, U.T. & MILLERET, C. : Layout of transcallosal activity in cat visual cortex revealed by optical imaging, *NeuroImage*, 36(3) : 804-21.

2008

— RIBOT, J., O'HASHI, K., AYAKA, A., TANAKA, S. : Anisotropy in the representation of direction preferences in cat area 18, *Eur. J. Neuroscience*, 27(10) : 2773-80.

**Publications de l'équipe « Mémoire spatiale et navigation »
Responsable : Sidney Wiener**

Revue à comité de lecture

2007

— CACQUEVEL, M., LAUNAY, S., CASTEL, H., BENCHENANE, K., CHEENNE, S., BUEE, L., MOONS, L., DELACOURTE, A., CARMELIET, P., VIVIEN, D. : Ageing and amyloid-beta peptide deposition contribute to an impaired brain tissue plasminogen activator activity by different mechanisms, *Neurobiol Dis*, 27(2) : 164-73.

2008

— ESCHENKO, O., RAMADAN, W., MÖLLE, M., BORN, J., SARA, S.J. : Sustained increase in hippocampal sharp-wave ripple activity during slow-wave sleep after learning, *Learn Mem.*, 15(4) : 222-8.

Chapitres d'ouvrages collectifs

2008

— BATTAGLIA, F.P., PEYRACHE, A., KHAMASSI, M. & WIENER S.I. : « Spatial decisions and neuronal activity in hippocampal projection zones in prefrontal cortex and striatum ». In :

Hippocampal place fields : Relevance to learning and memory. Ed : S.J.Y. Mizumori. Oxford University Press, pp. 289-311.

— SARA, S.J. : « Reconsolidation : historical perspectives and theoretical aspects ». In : Learning and Memory : A Comprehensive Reference. Ed : J. Byrne. Oxford, Elsevier, Vol. 1, pp. 461-75.

Autres travaux et activités de Alain Berthoz

Chapitres d'ouvrages collectifs

— BERTHOZ, A. (2007) : « L'homme virtuel ». In : L'homme artificiel. Eds : J.-P. Changeux et al. Paris, O. Jacob, pp. 224-36.

— FREYERMUTH S., LACHAUX J.-P., KAHANE P. & BERTHOZ A. (2007) : « Neural Basis of Saccadic Decision Making in the Human Cortex ». In : Representation and Brain. Ed. F. Shintaro. Springer, pp. 199-216.

Conférences

2007

— BERTHOZ, A. : « Development and function of the balance system in the early years », 19th European Conference Neurodevelopment and learning difficulties, Conférence Plénière, Institute for Neuro-physiological psychology, Pise, Italie, 22-23 septembre.

— BERTHOZ, A. : « Comment le cerveau s'y prend pour décider. Les apports de la neuro-physiologie à la compréhension de la prise de décision », Séminaire Approches plurielles de la décision, Ecole Nationale d'Administration, Paris, 28 septembre.

— BERTHOZ, A. : « Quels rapports l'homme entretient-il avec ses espaces ? », Colloque Maladie d'Alzheimer : S'adapter au patient. Paris, 16 octobre.

— BERTHOZ, A. : « Bases neurales de la décision », Colloque la neurophysiologie de la décision, Ecole Normale supérieure, Paris, 22 octobre.

— BERTHOZ, A. : « Réalité virtuelle et Neurosciences », Conférence plénière. Colloque STIC Cité des Sciences à Paris. 5 novembre.

— BERTHOZ, A. : « Les théories de Bergson sur la perception, la mémoire et le rire, au regard des données des neurosciences cognitives actuelles », Colloque L'Evolution créatrice de Bergson cent ans après (1907-2007) : Épistémologie et Métaphysique. Collège de France, Paris, 23 novembre.

— BERTHOZ, A. : « Comment le cerveau s'y prend pour décider », Réunion SGA, Ecole militaire, Paris, 29 novembre.

— BERTHOZ, A. : « Neural basis of the perception of space, movement and emotions », Fourth International Conference on Virtual Storytelling, Saint-Malo, 5-7 décembre.

— BERTHOZ, A. : « Perceptive integration and postural control », Conférence Plénière. Congrès Neuroriabilitazione e Robotica, Rome, 13-14 décembre.

— GIRARD, B., TABAREAU, N., BENNEQUIN, D., SLOTINE, J.-J., & BERTHOZ, A. : « A mathematical proof of the coupling of the spatiotemporal transformation and the superior colliculus mapping », Congrès annuel de la Société de Neurosciences américaine, San Diego, USA, 3-7 novembre.

— JERBI, K., KAHANE, P., MINOTTI, L., BERTRAND, O., BERTHOZ, A. & LACHAUX, J.-P. : « Towards Novel Brain Computer Interfaces via Online Detection of Gamma Oscillations in Intracerebral Recordings », From Neural Code to Brain/Machine Interface, Château de Montvillargenne, Gouvieux les Chantilly, Oise, France, 27-29 septembre 2007.

2008

— BERTHOZ, A. : « La pensée de Merleau-Ponty sur la perception au regard des neurosciences cognitives actuelles », Le temps et l'espace chez Merleau-Ponty, Ecole Normale Supérieure, Paris, 5-7 juin.

— BERTHOZ, A. : « Neural principles of natural eye and limb movements that might be used in robotics », Neurobotics Symposium, Freiburg, 20-22 juillet.

— Berthoz, A. : « Motricité, cognition, perception », 21^e Journée d'étude La paralysie cérébrale, des situations complexes, des pratiques en mutation, Conférence Plénière, Palais de l'UNESCO, Paris, 24 janvier.

— Berthoz, A. : « The human brain "projects" upon the world simplifying principles and rules for perception and action », Journée IPSEN Neurobiology of Umwelt : comment les êtres humains perçoivent le monde, Paris, Collège de France, 18 février.

— Berthoz, A. : « Cinématique de l'expression corporelle des émotions pendant la marche », Colloque Analyse 3D du Mouvement, Collège de France, 3 juin.

— Berthoz, A. : « La manipulation mentale des points de vue : un des fondements de la tolérance ? », Colloque La pluralité interprétative et les fondements historiques et cognitifs des changements de point de vue, Paris, Collège de France, 12 juin.

Organisation de réunions*2007*

— BERTHOZ, A. & KEMENY, A. : Séminaire « Images Virtuelles », Collège de France, Paris, 14 juin.

— BERTHOZ, A. & LAROCHE, S. : Colloque final ACI, Collège de France, Paris, 11 et 12 juin.

— BERTHOZ, A. & DARIO, P. : Brain - Machines Interfaces, Volterra, Italie, 16-21 septembre.

— CLARAC, F., BERTHOZ, A. & al : Colloque From Neural code : to brain/machine interface. Château de Montvillargenne, Gouvieux-les-Chantilly, Oise, France, 27-29 septembre 2007.

2008

— BERTHOZ, A. et en coopération avec la Fondation IPSEN : Journée IPSEN Neurobiology of Umwelt « Comment les êtres humains perçoivent le monde », Paris, 18 février.

— BERTHOZ, A. & Biometrics : Colloque Analyse 3D du Mouvement, à l'occasion du 15^e anniversaire des Réunions des Utilisateurs Vicon, Collège de France, Paris, 3 juin.

— GIRAULT, J.-A. & CHEMIN, J.-Y., BERTHOZ, A. & al. : Colloque « Mathématiques en Neurosciences », Ecole Nationale Supérieure de chimie de Paris, Paris, 10 juin.

— BERTHOZ, A., STOCK, B. & OSSOLA, C. : Colloque « La pluralité interprétative fondements historiques et cognitifs de la notion de point de vue », Collège de France, Paris, 12-13 juin.

Enseignement

— DARIO, P., JERBI, K., BERTHOZ, A. : NEUROBOTICS Summer School 2007 Brain-Machine Interface, Volterra, Italie, 16-21 septembre 2007.

Participation à l'organisation de la recherche

- Membre du Comité des Programmes scientifiques du CNES.
- Membre du Conseil consultatif pour la Science France/Japon.
- Membre du Conseil scientifique de l'Institut de Neurosciences de Trinity College à Dublin.
- Membre du Conseil pédagogique du Mastère de Sciences cognitives (Ecole doctorale 3C).
- Président du Comité scientifique de l'œuvre Falret pour les maladies mentales.
- Membre du Conseil scientifique du NEUROPOLE Ile-de-France et du RTRA « Ecole de Neurosciences de Paris ».
- Membre du Conseil scientifique de l'institut Max Planck, Tübingen.
- Membre de la Commission de diffusion culturelle du Conservatoire des Arts et Métiers.
- Membre du Comité Scientifique de l'IAIST-CNRS Joint Japanese-French Robotics Laboratory (JRL).

Collaboration avec l'Industrie

- Contrat avec la société Peugeot.
- Projet Européen Euréka MOVES sur les simulateurs avec la Société Renault et Max Planck Institut, Tuebingen, et TNO Hollande.
- Projet SCAN Pôle de compétitivité Bretagne avec la Société Archividéo.
- Organisation et Présidence du séminaire de prospective de la RATP sur « Cognition et mobilité », 5 séances et un atelier, 2007 & 2008.

Contrats de recherche et coopérations internationales

- Projet BACS : projet européen dans le cadre de Cognitive Systems.
- Projet « Asymétries cranio-faciales », Fondation Cotrel-Académie des Sciences (avec M^{me} D. Rousié).
- Projet NEST WAYFINDING n° 12959, FP6-2003-Nest-Path de la Communauté européenne.
- Programme Human Frontier Science Program (Coordinateur B. de Gelder-Tilbury) « L'Expression corporelle des émotions ».
- Projet NEUROPROBES, IP dans le EC IST programme « Integrating and strengthening the European research area (2002-2006) ».
- Projet NEUROBOTICS, Programme européen « Information Society Technologie-Future and Emerging Technologies ».

Thèses

- LAFON, M. (2008) : « Navigation humaine dans des environnements complexes : contribution des indices kinesthésiques et effet *d'a priori* », Collège de France, 29 mai 2008.